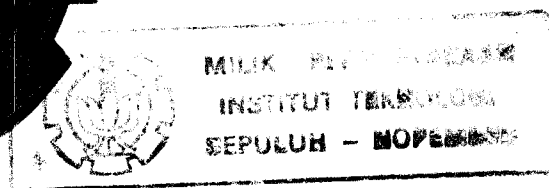


4909/HS/H/92
TUGAS AKHIR
(TN 1701)

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	6 NOV 1992
Terima Dari	H.
No. / TA	259 / TA

ANALISA KESTABILAN SISTEM KONTROL PNEUMATIK FEEDWATER REGULATION PADA BOILER



BSK
621.194
Pri
a-1
1992

Disusun oleh :

DWI PRIYANTA

NRP. 4874200150

**JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1992**

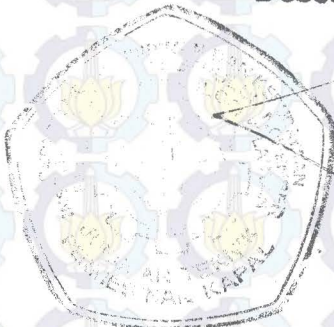
TUGAS AKHIR

(TN 1701)

**ANALISA KESTABILAN SISTEM KONTROL
PNEUMATIK FEEDWATER REGULATION
PADA BOILER**

Surabaya, 15 OKTOBER 1992

**Mengetahui / Menyetujui
Dosen Pembimbing**



Ir. BAMBANG SUPANGKAT

NIP. 130 355 298

**JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1992**



DEPARTEMEN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

Kampus ITS Sukilo Surabaya 60111 Telp. 597254 & 597274 Pos. 261-262 Telex. 34224

TUGAS AKHIR (TN 1701)

Nama : Dwi Priyanta NRP : 4874000150
Tahap : SARJANA Tahun Kuliah : 1991 / 2
Tgl. diberikan Tugas : 28 APRIL 1992 Tgl. diselesaikan Tugas : 28 APRIL 1992

Data-data untuk Tugas :

1. Type Kapal : GENERAL CARGO 2. Kecepatan : 14 knot
3. Radius Pelayaran : SURABAYA - OSARA 6 (894 miles)
4. Data-data lainnya :
LOA = 87,75 m B = 13,2 m D = 0,65
LWL = 86,3 m H = 6,7 m
LPP = 82,7 m T = 5,6 m

JENIS TUGAS :

A. Perencanaan Kamar Mesin/Sistem Perpipaan :

I. Tugas Wajib

1. Sistem pipa kapal (ship board systems)
 - 1.1. Sistem pipa ballast
 - 1.2. Sistem pipa bilga
 - 1.3. Sistem pipa sanitasi
 - 1.4. Sistem pipa kebakaran.
2. Sistem pipa mesin (propulsion systems)
 - 2.1. Sistem pipa bahan bakar
 - 2.2. Sistem pipa pelumas
 - 2.3. Sistem pipa pendingin
 - 2.4. Sistem pipa udara tekanan tinggi.
3. Perhitungan daya motor dan gambar tata letak kamar mesin (lay-out)
 - 3.1. Motor induk
 - 3.2. Motor bantu
 - 3.3. Tata letak kamar mesin (lay-out).

II. Tugas Tambahan (pilihlah satu)

1. Sistem pipa khusus :
 - 1.1.
2. Gambar Isometric untuk sistem pipa :
 - 2.1. SISTEM PIPA BAHAN BAKAR

B. Karya Tulis (Skripsi) :

ANALISA KESTABILAN SISTEN KONTROL PNEUMATIK FEEDWATER REGULATION
PADA BOILER

Dosen pembimbing,

Marsikan,



3.92

Ir. BAIMBANG SUPANGKAT

DWI PRIYANTA

Ir. BAIMBANG SUPANGKAT

NIP.:

NRP.: 4874000150

NIP.:



To my mom and my Grandma

KATA PENGANTAR

Terlebih dahulu penulis mengucapkan puji syukur kehadiran Tuhan YME atas rahmat-NYA dan hidayat-NYA sehingga selesailah penulisan skripsi tentang "Analasisa Kestabilan Feedwater Regulator pada Boiler".

Dalam menulis skripsi ini, penulis telah berusaha semaksimal mungkin untuk sempurnanya skripsi ini, namun karena terbatasnya kemampuan, mungkin skripsi ini jauh dari sempurna. Untuk itu perkenankan penulis untuk menyampaikan ucapan terima kasih pada :

1. Ibuku dan Nenekku yang telah memberi dorongan moril dan yang selalu mengharapkan agar penulis secepatnya menyelesaikan tugas ini.
2. Bapak Ir. Bambang Supangkat, selaku dosen pembimbing dan ketua jurusan Teknik Permesinan Kapal ITS.
3. Seseorang yang selalu memberi dorongan moril bagi penulis baik di saat susah maupun senang.
4. Rekan-rekan yang telah banyak membantu baik secara langsung maupun tidak.

Akhir kata, semoga tulisan ini dapat memberi manfaat bagi penulis maupun pembaca, serta kritik dan saran penulis harapkan dari pembaca demi perbaikan selanjutnya.

Surabaya Oktober 1992

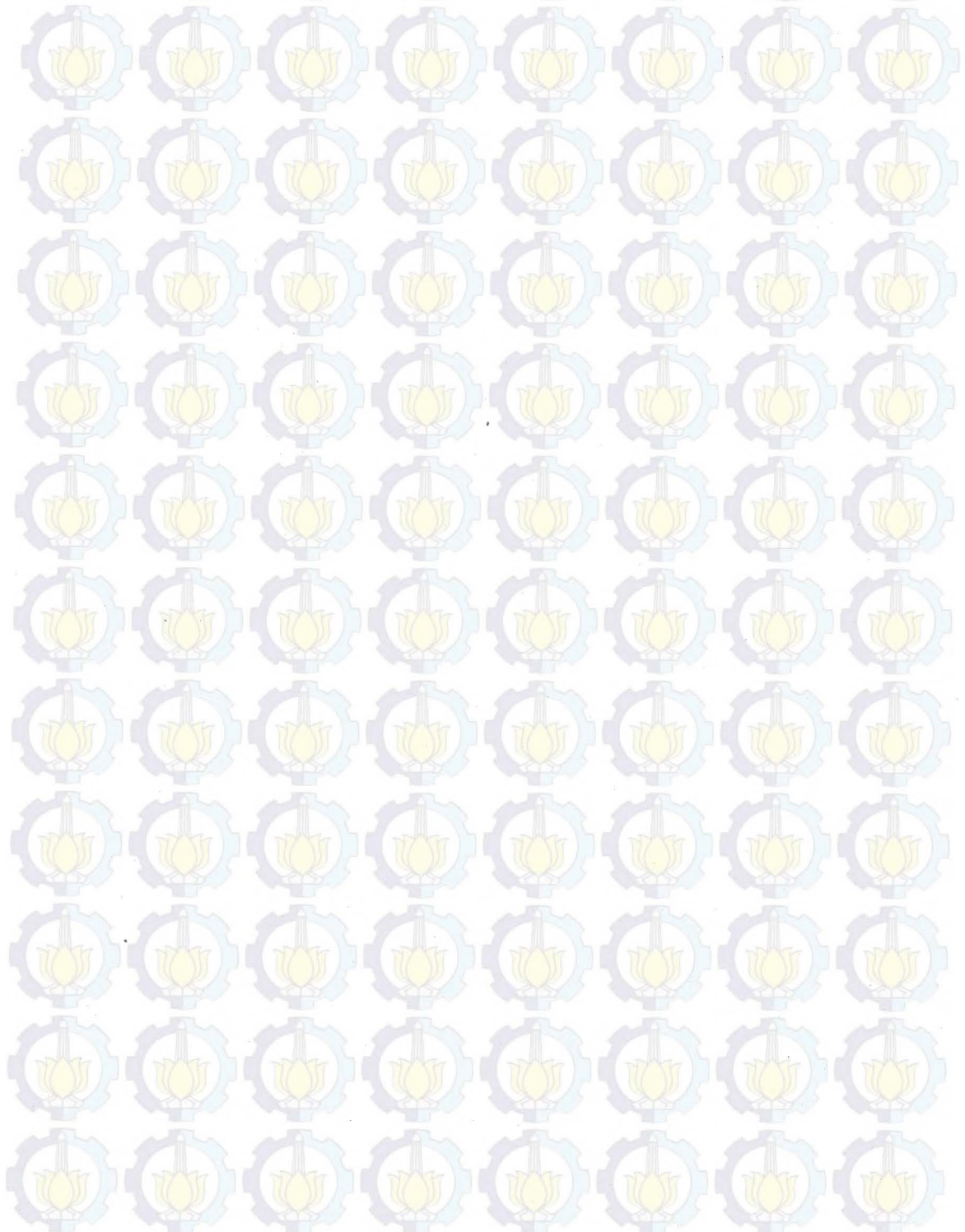
Penulis

(Dwi Priyanta)

DAFTAR ISI

	halaman
Lembar Pengesahan	i
Kata Pengantar	ii
Daftar isi	iii
Daftar notasi	v
Daftar gambar	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Umum	1
1.2 Latar belakang permasalahan	2
1.3 Tujuan penulisan	3
1.4 Pembatasan masalah	3
1.5 Metode penulisan	4
BAB II MODEL MATEMATIKA SISTEM PENGONTROLAN FEED WATER REGULATION	5
2.1 Diagram blok feedwater regulation pada boiler	6
2.2 Relai pneumatik diferensial	9
2.3 Aksi kontrol proporsional plus integral ..	12
2.4 Katup penggerak pneumatik	16
BAB III ANALISA KESTABILAN SISTEM	18
3.1 Fungsi alih sistem kontrol feedwater regu- lator	19
3.2 Analisa kestabilan feedwater regulator ...	24
3.3 Analisa respon transien feedwater regula- tor	26
3.4 Sensitivitas feedwater regulator	35

3.5 Kesalahan keadaan tunak	40
BAB IV KESIMPULAN	45
Daftar pustaka	46
Lampiran	47



DAFTAR GAMBAR

- 2.1 Diagram skematik dari feedwater regulator
- 2.2 Penyederhanaan sistem pada boiler
- 2.3 Diagram blok sistem tinggi air
- 2.4 Diagram blok sistem feedwater pada boiler
- 2.5 Diagram skematik relai diferensial pneumatik
- 2.6 Diagram blok relai diferensial
- 2.7 Diagram skematik kontroler $P + I$
- 2.8 Diagram blok kontroler $P + I$
- 2.9 Katup pneumatik
- 3.1 Diagram blok sistem pengontrolan feedwater regulator
- 3.2 Grafik aliran sinyal dari sistem pengontrolan feedwater regulator
- 3.3 Kurva respon transien untuk redaman kurang
- 3.4 Kurva respon transien untuk redaman kritis
- 3.5 Kurva respon transien untuk redaman lebih
- 3.6 Diagram blok feedwater regulator
- 3.7 Aliran sinyal feedwater regulator
- 3.8 Sistem kontrol dengan umpan balik

DAFTAR NOTASI

A = luas efektif bellows / pengangin

a = jarak antara ujung flapper-nozel pada kontroler P+I

b = jarak antara ujung flapper-nozel pada kontroler P+I

C = kapasitansi sistem

e = kesalahan sinyal penggerak

e_{ss} = kesalahan penggerak keadaan tunak

H = tinggi air pada drum boiler pada keadaan tunaknya

h = deviasi kecil tinggi air pada drum boiler dari keadaan tunaknya

K, k = konstanta

k = konstanta penguatan pegas

K_1 = konstanta penguatan relai diferensial

k_1 = konstanta penguatan flapper nozel pada relai diferensial pneumatik

k_2 = konstanta penguatan bellows pada relai diferensial pneumatik

k_3 = konstanta penguatan bellows pada relai diferensial pneumatik

$$k_a = \frac{k_1 k_3}{k_2}$$

k_c = konstanta penguatan untuk perpindahan katup penggerak

k_p = konstanta penguatan kontroler P + I

k_p = koefisien kesalahan statik

k_q = konstanta penguatan untuk perpindahan katup penggerak



k_s = konstanta pegas ekuivalen

$k_v = k_c.k_q$

L = penguatan lup

P = penguatan Mason

p = tekanan

\bar{P}_b = tekanan balik nozel

\bar{P}_c = tekanan kontrol pada keadaan setimbang pada relai

P_k = penguatan atau transmitansi lintasan maju

P_s = tekanan udara suplai

\bar{Q} = laju aliran air dan uap dalam keadaan tunak

Q = laju aliran gas pada kontroler P+I pada keadaan tunak

q = perubahan laju aliran gas pada kontroler P+I

q_i = deviasi kecil laju aliran air masuk ke boiler dari keadaan tunaknya

q_o = deviasi kecil laju aliran uap keluar boiler dari keadaan tunaknya

R = tahanan sistem

S_k^T = sensitivitas perubahan sistem T terhadap perubahan variabel K

s = variabel kompleks hasil transformasi Laplace

T_i = konstanta waktu pada kontroler P+I

X = jarak antara nozel flapper pada keadaan seimbang

x = perpindahan katup penggerak pneumatik pada keadaan seimbang

\bar{x} = deviasi kecil dari jarak antara nozel flapper

\bar{x} = deviasi kecil dari perpindahan katup penggerak

pneumatik

\bar{Y} = perpindahan bellows (pada relai diferensial) pada keadaan seimbang

y = deviasi kecil dari perpindahan bellows (pada relai diferensial)

\bar{Z} = perpindahan bellows (pada relai diferensial) pada keadaan seimbang

z = deviasi kecil dari perpindahan bellows (pada relai diferensial)

Δ = determinan grafik aliran sinyal

Δ_k = kofaktor dari determinan lintasan maju ke k

ω_d = frekwensi alamiah teredam

ω_n = frekwensi alamiah tak teredam

ζ = rasio redaman sistem

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Umum

Suatu steam generator merupakan kombinasi yang kompleks dari economizer, boiler, superheater, reheater, dan air pre-heater. Selain itu beberapa peralatan bantu juga diperlukan pada steam generator.

Dari berbagai komponen steam generator, boiler merupakan komponen utama dalam memproduksi uap. Karena itu perlu suatu sistem pengontrolan yang menjamin kontinyuitas kerja dari boiler yang pada akhirnya berpengaruh pada kelangsungan kerja dari steam generator.

Boiler water level, exhaust steam pressure, steam temperatur, dan pembakaran (combustion) adalah beberapa faktor yang perlu mendapat perhatian agar proses kerja dari boiler dalam menghasilkan uap tidak terganggu. Untuk itu perlu diadakan pengontrolan agar harga-harga dari tekanan, suhu uap, serta laju bahan bakar dan udara pembakaran sesuai dengan harga yang direncanakan.

Selain alasan-alasan di atas, pengontrolan juga diperlukan karena kecenderungan untuk mendesain boiler diarahkan untuk mencapai perbandingan antara uap yang dihasilkan dengan air yang diuapkan pada harga yang setinggi mungkin.

1.2 Latar belakang permasalahan

Pada saat boiler beroperasi, pada gelas pengukur ketinggian air akan terbaca lebih tinggi daripada saat boiler tersebut tidak beroperasi, ini disebabkan adanya gelembung-gelembung uap yang terdapat pada drum boiler. Banyaknya gelembung-gelembung uap ini tergantung dari beban boiler. Jika gelembung-gelembung ini berubah menjadi uap, artinya air yang berada pada drum boiler akan berkurang, maka tekanan dalam drum boiler akan berkurang. Adanya gelembung-gelembung yang menyebabkan tinggi permukaan air pada drum boiler lebih tinggi dari tinggi sebenarnya dikenal dengan *swell*. Masalah ini bisa diatasi dengan sistem pengatur tinggi muka cairan pada drum boiler (*water level control*).

Pada saat boiler kembali normal tekanan pada drum akan naik dan pembentukan gelembung-gelembung akan berkurang yang menyebabkan tinggi permukaan air pada drum akan turun. Penambahan air pada drum akan menghilangkan pembentukan gelembung-gelembung uap air. Kondisi seperti ini dikenal dengan *shrinkage*.

Masalah *swell* dan *shrinkage* ini bisa diatasi dengan memasang elemen pengatur aliran uap. Untuk menghindari tekanan tekanan pada drum yang bervariasi maka dipasang elemen pengatur aliran air. Pemakaian ketiga elemen kontrol ini yang biasa disebut dengan *three element control*.

Masalah yang terjadi pada three element control adalah masalah kestabilan sistem kontrol dan respon dari sistem kontrol terhadap perubahan setiap masukan.

1.3 Tujuan penulisan

Tujuan yang akan dicapai dalam penulisan tugas akhir ini adalah untuk :

1. Menganalisa kestabilan dari pneumatic three element control untuk pengaturan feedwater pada boiler.
2. Menganalisa faktor-faktor yang mempengaruhi cepat atau lambatnya respon transien sistem.
3. Menganalisa sensitivitas sistem tersebut.
4. Menganalisa kesalahan keadaan tunak (stedy state) dari sistem.

1.4 Pembatasan masalah

Karena keterbatasan waktu dan kemampuan penulis maka permasalahan ini akan dibatasi sebagai berikut :

1. Pengontrolan dan analisa kestabilan hanya pada dilakukan pada feedwater regulaor saja.
2. Analisa kestabilan meliputi analisa kestabilan mutlak dengan menggunakan kriteria kestabilan Routh.
3. Analisa respon transien dan kesalahan keadaan tunak dilakukan dengan sinyal masukan fungsi tangga satuan (unit step input function).
4. Sistem dianggap linier.

1.5 Metode penulisan

Metodologi penulisan tugas akhir ini meliputi :

1. Study literatur.
2. Merumuskan masalah.
3. Pemecahan permasalahan.
4. Kesimpulan.

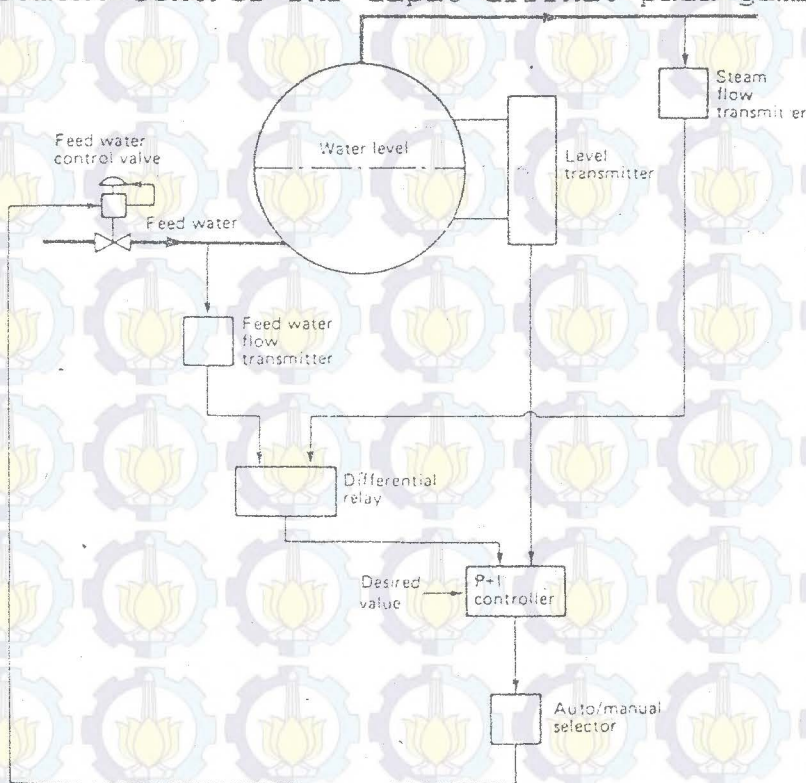
Langkah pertama dalam merumuskan masalah adalah dengan menurunkan model matematika sistem, baik model matematika dari sistem feedwater regulaor maupun model matematika dari peralatan kontrol. Dari model matematika ini dapat dicari fungsi alih (*transfer function*) dari sistem secara keseluruhan.

Pemecahan permasalahan dapat dilakukan dengan menganalisa fungsi alih yang telah diturunkan pada perumusan masalah. Analisa ini meliputi analisa kestabilan sistem, respon transien sistem, sensitivitas sistem, dan kesalahan keadaan tunak sistem.

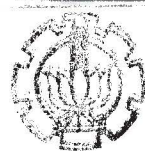
Kesimpulan dari analisa ini meliputi penentuan stabil tidaknya sistem kontrol, menentukan parameter-parameter apa yang mempengaruhi cepat lambatnya respon transien, menentukan sensitivitas masing-masing elemen kontrol, dan penentuan ada atau tidaknya kesalahan keadaan tunak.

BAB II MODEL MATEMATIKA SISTEM PENGONTROLAN FEEDWATER REGULATION

Ada berbagai jenis pengontrolan pada feedwater regulator antara lain *single element control*, *two element control*, dan *three element control*. Pada umumnya pengontrolan feedwater regulator pada boiler di kapal maupun industri menggunakan *three element control*. Pada *three element control* variabel-variabel yang diukur sebagai sinyal kontrol antara lain *steam flow*, *drum level*, dan *feedwater flow*. Diagram skematik dari *three element control* ini dapat dilihat pada gambar 2.1.



gambar 2.1
diagram skematik dari feedwater regulator



Pada kondisi balance steam flow harus sama dengan feedwater flow. Dua sinyal ini dibandingkan dalam differential relay. Output dari relay ini diumpungkan pada two term controller (gabungan antara kontroler proporsional dan kontroler integral). Deviasi antara harga aktual dan harga yang dikehendaki pada drum level dan perubahan antara feedwater dan steam flow akan menghasilkan suatu aksi pengontrolan yang mengatur feed water control valve.

2.1 Diagram blok feedwater regulation pada boiler

Seperti yang telah diuraikan di atas, variabel yang dikontrol adalah aliran uap, aliran air dan tinggi air dalam drum. Untuk membuat model matematika dari sistem ini perlu didefinisikan tahanan dan kapasitansi sistem.

Tahanan sistem ini didefinisikan sebagai berikut :

$$R = \frac{\text{perubahan tinggi air pada drum boiler ; m}}{\text{perubahan laju aliran uap ; m}^3/\text{det}}$$

Sedang untuk kapasitansi sistem didefinisikan sebagai :

$$C = \frac{\text{perubahan cairan yang tersimpan ; m}^3}{\text{perubahan tinggi air pada drum ; m}}$$

Selain itu perlu pula didefinisikan beberapa besaran yang berguna untuk melukiskan sistem ke dalam model matematika. Besaran itu adalah :

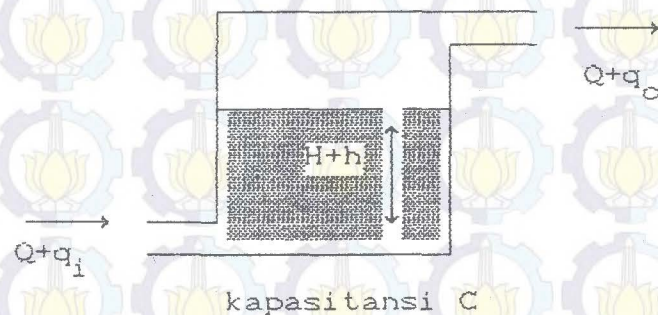
$$\bar{Q} = \text{laju aliran air dan uap dalam keadaan tunak (steady)} ; \text{m}^3/\text{det}$$

q_i = deviasi kecil laju aliran air masuk ke boiler dari keadaan tunaknya ; m^3/det

q_o = deviasi kecil laju aliran uap keluar boiler dari keadaan tunaknya ; m^3/det

\bar{H} = tinggi air pada drum boiler, pada keadaan tunaknya ; m

h = deviasi kecil tinggi air pada drum boiler dari keadaan tunaknya ; m



gambar 2.2
penyederhanaan sistem pada boiler

Seperti yang telah diasumsikan pada pembatasan masalah, sistem ini adalah linier. Persamaan diferensial sistem dapat diturunkan berdasarkan kenyataan bahwa aliran air yang masuk dikurangi dengan aliran uap yang keluar selama selang waktu kecil dt adalah sama dengan jumlah penambahan cairan yang tersimpan dalam tangki. Sehingga persamaan diferensial sistem adalah :

$$C \, dh = (q_i - q_o) dt \quad \dots\dots\dots 2.1$$

Dari definisi tahanan, hubungan antara q_o dan h adalah :

$$q_o = \frac{h}{R} \quad \dots\dots\dots 2.2$$

Jika R konstan, dengan mensubstitusikan persamaan 2.2 ke dalam persamaan 2.1, maka persamaan sistem akan berubah menjadi :

$$RC \frac{dh}{dt} + h = R \cdot q_i \quad \dots\dots\dots 2.3$$

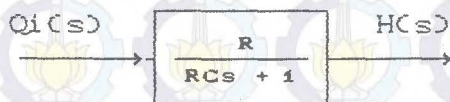
Transformasi Laplace persamaan 2.3 adalah :

$$(RCs + 1) H(s) = R q_i(s) \quad \dots\dots\dots 2.4$$

Fungsi alih (transfer function) dari persamaan 2.4 dengan menganggap q_i sebagai input dan h sebagai output adalah :

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad \dots\dots\dots 2.5$$

Diagram blok dari persamaan 2.5 dapat dilihat pada gambar 2.3.

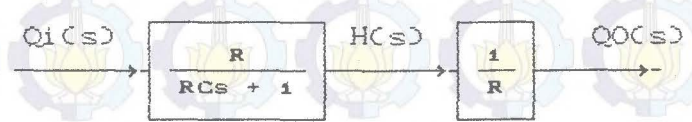


gambar 2.3
diagram blok sistem tinggi air

Dengan mentransformasi persamaan 2.2 dalam transformasi Laplace akan diperoleh hubungan :

$$\frac{Q_o(s)}{H(s)} = \frac{1}{R} \dots\dots\dots 2.6$$

Sehingga diagram blok untuk seluruh sistem adalah :

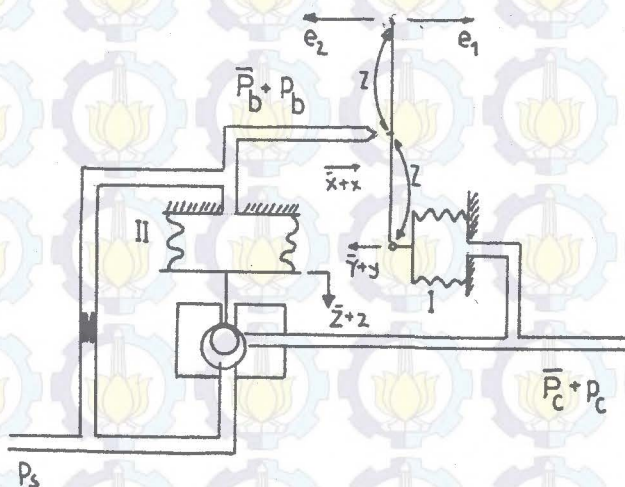


gambar 2.4
diagram blok sistem feedwater pada boiler

2.2 Relay pneumatik diferensial

Relaidapat digunakan untuk penambahan atau pengurangan dari sejumlah sinyal input. Untuk pengontrolan feedwater regulator akan digunakan dua sinyal input yaitu sinyal dari aliran air yang memasuki boiler dan aliran uap yang meninggalkan boiler. Diagram skematik dari relai diferensial pneumatik ini dapat dilihat pada gambar 2.5.

Persamaan diferensial dari relai ini dapat diturunkan sebagai berikut, misal kesalahan penggerak sama dengan nol, atau $e = e_1 - e_2 = 0$ dan keadaan keseimbangan dicapai pada jarak nozel-flapper sama dengan \bar{X} , perpindahan pengangin (bellows) sama dengan \bar{Y} , perpindahan pengangin II sama dengan \bar{Z} , tekanan balik nozel sama dengan \bar{P}_b dan tekanan kontrol sama dengan \bar{P}_c . Jika



gambar 2.5

diagram skematik relai diferensial pneumatik

terdapat kesalahan penggerak maka jarak flapper-nozel, perpindahan pengangin I dan II, tekanan balik dan tekanan kontrol akan menyimpang dari harga keseimbangan masing-masing yaitu x , y , z , p_b dan p_c (arah positif ditunjukkan oleh arah anak panah).

Jika hubungan antara variasi tekanan balik nozel dan variasi jarak flapper-nozel adalah linier, maka diperoleh persamaan :

$$p_b = -k_1 \cdot x \dots\dots\dots 2.7$$

dengan k_1 suatu konstanta.

Untuk pengangin II :

$$p_b = k_2 \cdot z \quad \dots\dots\dots 2.8$$

dengan k_2 suatu konstanta.

Posisi dari katup bola yang tergantung pada perpindahan pengangin II akan menentukan tekanan kontrol. Jika hubungan antara p_c dan z linier maka :

$$p_c = - k_3 \cdot z \quad \dots\dots\dots 2.9$$

dengan k_3 suatu konstanta.

Dari persamaan 2.7 sampai 2.9 diperoleh hubungan :

$$p_c = k_a \cdot x \quad \dots\dots\dots 2.10$$

dengan $k_a = \frac{k_1 k_3}{k_2}$ adalah suatu konstanta.

Untuk pergerakan flapper kita peroleh :

$$x = \frac{(e_1 - e_2)}{2} - y \quad \dots\dots\dots 2.11$$

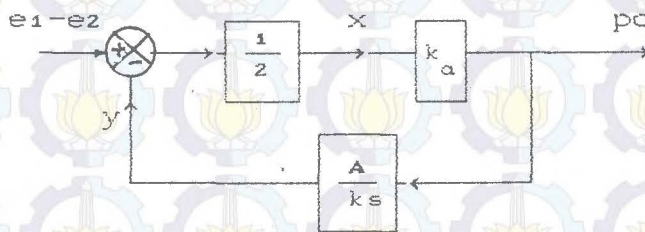
Pengangin II bekerja sebagai pegas, sehingga berlaku persamaan :

$$A \cdot p_c = k_s \cdot y \quad \dots\dots\dots 2.12$$

dimana : A = luas efektif pengangin II

k_s = konstanta pegas ekuivalen

Diagram blok dari persamaan 2.10 sampai 2.11 adalah :



gambar 2.6
diagram blok relai diferensial

Sedang fungsi alih dari diagram blok di atas adalah :

$$\frac{Pc(s)}{E1(s) - E2(s)} = \frac{1/2 ka}{1 + \frac{ka \cdot A}{2ks}} \quad \dots\dots\dots 2.13$$

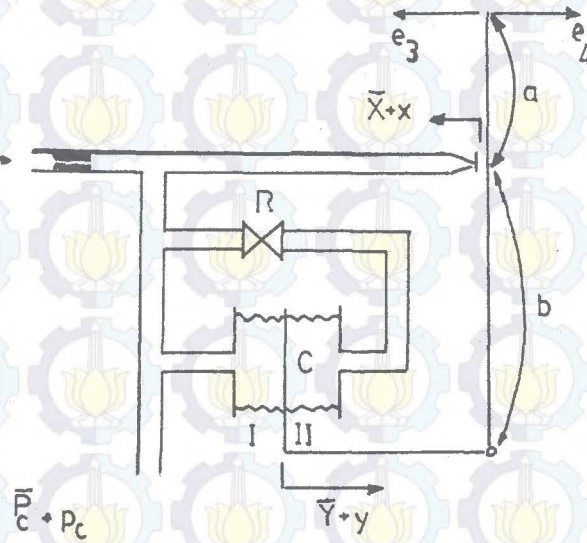
Dalam praktek harga $\frac{ka \cdot A}{ks} \gg 1$, maka persamaan 2.13 dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{Pc(s)}{E1(s) - E2(s)} = \frac{ks}{A} = K_1 \quad \dots\dots\dots 2.14$$

2.3 Aksi kontrol proporsional plus integral

Persamaan untuk aksi kontrol proporsional plus integral ini dapat diturunkan dari diagram skematik kontroler proporsional plus integral pneumatik di bawah 2.7.

Misal kesalahan penggerak $e = e_3 - e_4 = 0$ dan keadaan seimbang dicapai pada jarak nozel-flapper sama dengan X perpindahan pengangin I dan II sama dengan Y dan tekanan kontrol P_c maka untuk kesalahan penggerak jarak flapper - nozel, perpindahan pengangin dan tekanan kontrol masing-masing berubah menjadi x , y dan pc . Jika kapasitas



gambar 2.7
diagram skematik kontroler P+I

kedua kedua pengangin adalah C , luas efektif pengangin A dan konstanta kedua pegas k_s , maka untuk perubahan tekanan pengangin sebesar p akan diperoleh persamaan :

$$(p_c - p).A = k_s.y \quad \dots\dots\dots 2.15$$

sedang transformasi Laplace persamaan di atas adalah :

$$[P_c(s) - P(s)]A = k_s.Y(s) \quad \dots\dots\dots 2.16$$

Dengan mendefinisikan tahanan aliran yang melalui katup :

$$R = \frac{\text{perubahan beda tekanan udara suplai ; } N/m^2}{\text{perubahan laju aliran gas ; } m/det}$$

maka akan diperoleh persamaan :

$$R = \frac{d \Delta P}{dQ}$$

atau

$$q = \frac{p_c - p}{R} \quad \dots\dots\dots 2.17$$

Transformasi Laplace persamaan 2.17 adalah :

$$Q(s) = \frac{P_c(s) - P(s)}{R} \dots\dots\dots 2.18$$

Sedang kapasitas pengangin, C, didefinisikan sebagai :

$$C = \frac{\text{perubahan berat udara yang tersimpan ; N}}{\text{perubahan tekanan gas ; N/m}}$$

atau

$$C = \frac{dm}{dp} \dots\dots\dots 2.19$$

Karena $dQ = \frac{dm}{dt}$, maka persamaan 2.19 dapat diubah menjadi :

$$dQ = \frac{C dp}{dt} \dots\dots\dots 2.20$$

Sedang transformasi Laplace persamaan 2.20 adalah :

$$Q(s) = CsP(s) \dots\dots\dots 2.21$$

Dengan menggabungkan persamaan 2.18 dan 2.21 akan diperoleh :

$$\frac{P(s)}{P_c(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \dots\dots\dots 2.22$$

Untuk gerakan flapper - nozel akan diperoleh :

$$x = \frac{b}{a+b} (e_3 - e_4) - \frac{a}{a+b} y \dots\dots\dots 2.23$$

Sedang transformasi Laplace persamaan 2.23 adalah :

$$X(s) = \frac{b}{a+b} (E_3(s) - E_4(s)) - \frac{a}{a+b} Y(s) \dots\dots\dots 2.24$$

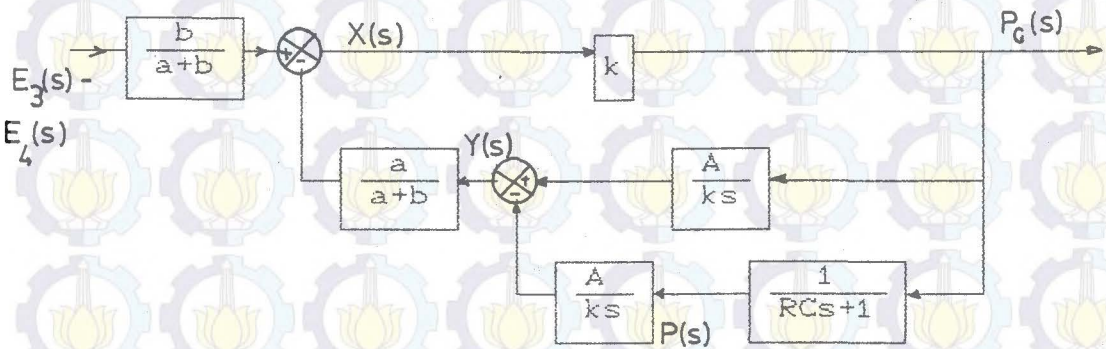
Hubungan antara pc dan x adalah :

$$p_c = k x \dots\dots\dots 2.25$$

Sedang transformasi Laplace persamaan 2.25 adalah :

$$P_c(s) = k X(s) \dots\dots\dots 2.26$$

Dari persamaan 2.16, 2.21, 2.24 dan 2.26 dapat diturunkan diagram blok untuk aksi proporsional plus integral seperti pada gambar 2.8.



gambar 2.
diagram blok kontroler P+I

Fungsi alih untuk diagram blok di atas adalah :

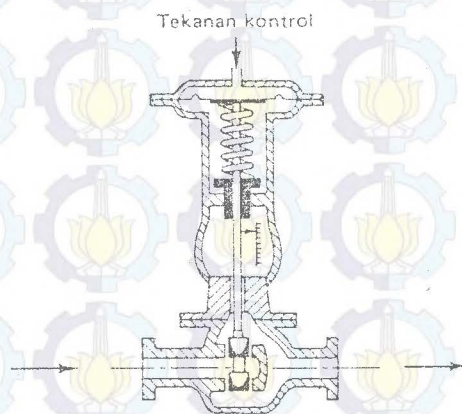
$$\frac{P_c(s)}{E_3(s) - E_4(s)} = \frac{\frac{b}{a+b} k}{1 + \frac{ka}{a+b} \frac{A}{ks} \left(1 - \frac{1}{RCs+1} \right)} \dots\dots 2.27$$

Dalam praktek harga $\frac{ka}{a+b} \frac{A}{ks} \left(1 - \frac{1}{RCs+1} \right) \gg 1$ sehingga dengan mengubah $\frac{b \cdot ks}{A} = k_p$ dan $RC = T_i$ dimana k_p mewakili konstanta kontroler proporsional dan T_i mewakili konstanta waktu integrasi maka persamaan 2.27 dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{P_c(s)}{E(s) - E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \dots\dots\dots 2.28$$

2.4 Katup penggerak pneumatik

diagram skematik dari katup penggerak pneumatik ditunjukkan pada gambar 2. Jika luas diafragma A, dan kesalahan penggerak nol, maka tekanan kontrol sama dengan P_c dan perpindahan katup penggerak sama dengan X.



gambar 2. 2
katup pneumatik

Dengan mendefinisikan p_c dan x masing-masing perubahan kecil dari keadaan seimbang tekanan kontrol P_c dan perpindahan katup penggerak X , maka akan diperoleh suatu persamaan :

$$A.p_c = m\ddot{x} + f\dot{x} + kx \quad \dots\dots\dots 2.29$$

dimana : m = massa katup dan batang katup

f = koefisien gesekan viskos

k = konstanta pegas

Jika gaya yang ditimbulkan oleh massa dan gesekan viskos adalah sangat kecil, maka persamaan 2.29 dapat disederhanakan menjadi :

$$A.p_c = kx \quad \dots\dots\dots 2.30$$

yang fungsi alihnya :

$$\frac{X(s)}{P_c(s)} = \frac{A}{k} = k_c \quad \dots\dots\dots 2.31$$

Jika perubahan aliran melalui katup penggerak pneumatik q_i sebanding dengan x , maka perubahan perpindahan katup adalah :

$$q_i = k_q \cdot x \quad \dots\dots\dots 2.32$$

Transformasi Laplace dari persamaan 2.32 adalah :

$$Q_i(s) = k_q \cdot X(s) \quad \dots\dots\dots 2.33$$

Fungsi alih antara q_i dan p_c menjadi :

$$\frac{Q_i(s)}{P_c(s)} = k_c \cdot k_q = k_v \quad \dots\dots\dots 2.34$$

BAB III ANALISA KESTABILAN SISTEM

Langkah pertama dalam menganalisa sistem kontrol adalah menurunkan model matematika sistem. Setelah model diperoleh, berbagai metode dapat digunakan untuk analisa performansi sistem.

Karakteristik perilaku dinamik sistem kontrol yang paling penting adalah kestabilan mutlak yang mencirikan bahwa sistem stabil atau tidak stabil. Sistem kontrol berada dalam keadaan kesetimbangan jika tanpa ~~keada~~ adanya suatu gangguan atau masukan, keluaran berada dalam keadaan yang tetap.

Suatu sistem linier parameter konstan dikatakan stabil jika pada akhirnya kembali ke keadaan kesetimbangan ketika dikenai suatu gangguan, dan dikatakan tidak stabil jika keluaran berosilasi terus menerus atau keluaran membesar tanpa batas dari keadaan kesetimbangannya ketika dikenai suatu gangguan.

Selain kestabilan mutlak, perilaku sistem yang penting yang harus diperhatikan meliputi kestabilan relatif dan kesalahan keadaan tunak. Karena sistem kontrol melibatkan penyimpanan energi, maka keluaran sistem ketika dikenai suatu masukan tidak bisa mengikuti secara serentak tapi menunjukkan respon transien sebelum mencapai keadaan tunak.

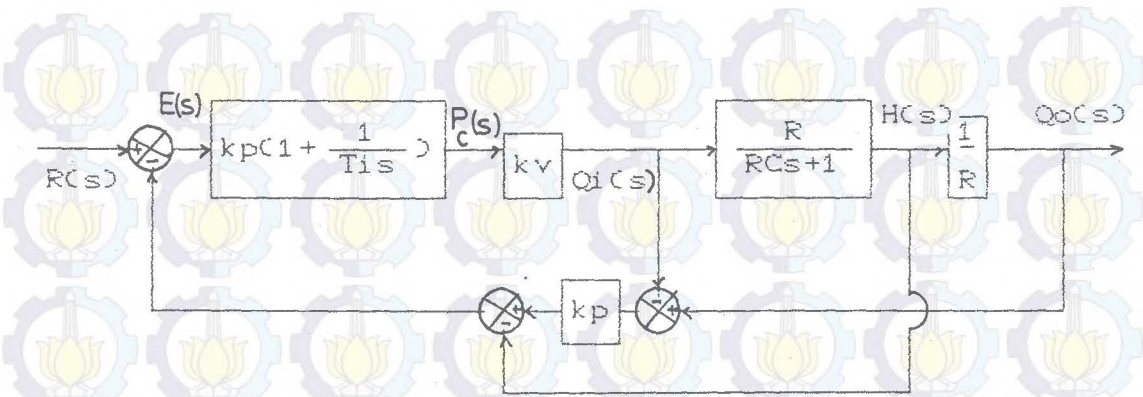
Jika keluaran keadaan tunak sistem tidak tepat benar dengan masukan, maka dikatakan sistem mempunyai kesalahan keadaan tunak. Selain itu harus diuji pula perilaku respon transien, seperti waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak yang baru.

Untuk menganalisa respon transien diperlukan sinyal masukan uji (test input signals). Sinyal masukan uji yang biasa digunakan adalah fungsi tangga, fungsi ramp, fungsi percepatan, fungsi impuls, fungsi sinusoida dan sebagainya. Jika masukan sistem kontrol merupakan fungsi waktu yang berangsur-angsur berubah maka fungsi waktu ramp merupakan sinyal uji yang baik. Demikian pula jika sistem dikenai gangguan secara tiba-tiba maka fungsi waktu tangga (step) merupakan sinyal uji yang baik dan untuk sistem yang dikenai masukan-masukan kejutan sinyal uji yang paling baik adalah fungsi impuls.

3.1 Fungsi alih sistem kontrol feedwater regulator

Pada sub bab ini akan diturunkan fungsi alih sistem pengontrolan feedwater regulator secara keseluruhan, yang model matematikanya telah diturunkan secara terpisah pada bab dua. Untuk itu perlu digambar diagram blok sistem.

Diagram blok ini dapat dilihat pada gambar 3.1.



gambar 3.1
diagram blok sistem pengontrolan feedwater regulator

Fungsi alih sistem ini bisa diperoleh dengan jalan menyederhanakan diagram blok di atas. Fungsi alih sistem akan lebih mudah diturunkan jika diagram blok pada gambar 3.1 disajikan dalam bentuk grafik aliran sinyal, yang selanjutnya fungsi alih tersebut bisa diperoleh dengan rumus penguatan Mason

$$P = \frac{1}{\Delta} \sum_k P_k \Delta_k \dots\dots\dots 3.1$$

dimana : P_k = penguatan atau transmitansi lintasan maju ke k

Δ = determinan grafik
= 1 - (jumlah semua penguatan lup) +
(jumlah hasil kali penguatan dari semua kombinasi yang mungkin dari dua lup yang tidak bersentuhan) - (jumlah hasil kali penguatan semua kombinasi yang mungkin dari tiga lup yang tidak bersentuhan) + ...

$$= 1 - \sum_a L_a + \sum_{b,c} L_b \cdot L_c - \sum_{d,e,f} L_d L_e L_f + \dots$$

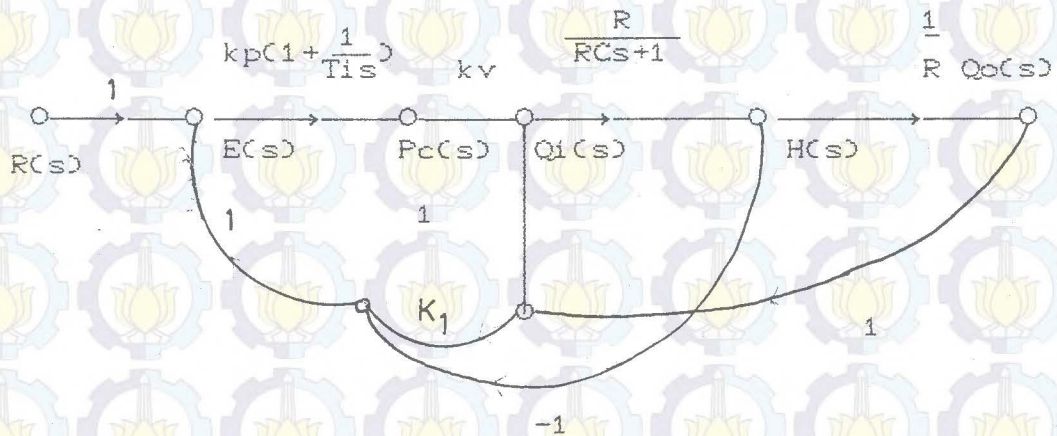
$\sum_a L_a$ = jumlah dari semua penguatan lup yang berbeda

$\sum_{b,c} L_b \cdot L_c$ = jumlah hasil kali penguatan dari semua kombinasi yang mungkin dari dua lup yang tidak bersentuhan

$\sum_{d,e,f} L_d L_e L_f$ = jumlah hasil kali penguatan dari semua kombinasi yang mungkin dari tiga lup yang tidak bersentuhan

Δ_k = kofaktor dari determinan lintasan maju ke k dengan menghilangkan lup-lup yang menyentuh lintasan maju ke k.

Grafik aliran sinyal dari gambar 3.1 dapat dilihat pada gambar 3.2.



gambar 3.2
grafik aliran sinyal dari sistem
pengontrolan feedwater regulator



MILIK PERPUSTAKAAN
INSTITUT TEKNOLOGI
SEPULUH - NOPELSEN

Dari grafik aliran sinyal dapat diturunkan penguatan lintasan maju dari aliran sinyal :

$$P_1 = \frac{k_p k_v}{RCs + 1} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \dots \dots \dots 3.2$$

sedangkan penguatan lupnya adalah :

$$L_1 = -k_v k_1 k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \dots \dots \dots 3.3$$

$$L_2 = -k_v k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left(\frac{R}{RCs + 1} \right) \dots \dots \dots 3.4$$

$$L_3 = k_v k_1 k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left(\frac{1}{RCs + 1} \right) \dots \dots \dots 3.5$$

Determinan grafik diberikan oleh :

$$\begin{aligned} \Delta &= 1 - (L_1 + L_2 + L_3) \\ &= 1 + k_v k_1 k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) + k_v k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left(\frac{R}{RCs + 1} \right) \\ &\quad - k_v k_1 k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left(\frac{1}{RCs + 1} \right) \\ &= 1 - k_v k_1 k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left[-1 - \frac{R}{k_1(RCs + 1)} + \frac{1}{RCs + 1} \right] \\ &= 1 - \frac{k_v k_p}{(RCs + 1)T_i s} (-k_1 RCs - R)(T_i s + 1) \\ &= \frac{(RCs + 1)T_i s}{(RCs + 1)T_i s} + \frac{k_v k_p}{(RCs + 1)T_i s} (k_1 RCs + R)(T_i s + 1) \\ &= \frac{RCT_i (1 + k_v k_p k_1)s^2 + k_v k_p R(T_i + k_1 T_i)s + k_v k_p R}{(RCs + 1)T_i s} \dots \dots 3.6 \end{aligned}$$

Kofaktor Δ_1 diperoleh dari Δ dengan menghilangkan lup-lup yang menyentuh P_1 , sehingga :

$$\Delta_1 = 1 \dots \dots \dots 3.7$$

Fungsi alih sistem dapat diperoleh dari rumus penguatan Mason

$$\frac{Q_o(s)}{R(s)} = P = \frac{P_1 \Delta_1}{\Delta}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{k_p k_v \frac{1}{R C s + 1} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)}{\frac{R C s + 1}{R T_i s (1 + k_v k_p k_1) s^2 + k_v k_p R (T_i + k_1 T_i) s + k_v k_p R}} \\
 &= \frac{k_p k_v (T_i s + 1)}{R T_i (1 + k_v k_p k_1) s^2 + k_v k_p R T_i (1 + k_1) s + k_v k_p R} \quad \dots\dots\dots 3.8
 \end{aligned}$$

Karena harga $k_v k_p k_1 \gg 1$ maka persamaan 3.8 dapat diubah menjadi :

$$\begin{aligned}
 \frac{Q_o(s)}{R(s)} &= \frac{k_p k_v (T_i s + 1)}{R T_i k_v k_p k_1 s^2 + k_v k_p R T_i (1 + k_1) s + k_v k_p R} \\
 &= \frac{s + \frac{1}{T_i}}{R k_1 C s^2 + (1 + k_1) s + 1/T_i} \quad \dots\dots\dots 3.9
 \end{aligned}$$

dengan mensubstitusikan :

$$J = k_1 C$$

$$F = T_i (1 + k_1)$$

$$K = 1/T_i$$

kedalam persamaan 3.9 akan diperoleh persamaan baru :

$$\begin{aligned}
 \frac{Q_o(s)}{R(s)} &= \frac{s + k}{R(J s^2 + K F s + K)} \\
 &= \frac{k/J (s + k)}{K/R (s^2 + K F/J s + K/J)} \quad \dots\dots\dots 3.10
 \end{aligned}$$

Dengan mendefinisikan :

$$\omega_n = \text{frekwensi alamiah tak teredam} = \sqrt{K/J}$$

ζ = rasio redaman sistem

$$= \frac{K F}{2 \sqrt{K J}}$$

maka persamaan 3.10 berubah menjadi :

$$\frac{Qo(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{KR} \frac{(s+K)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots 3.11$$

yang merupakan penyederhanaan dari fungsi alih sistem.

3.2 Analisa kestabilan feedwater regulator

Kestabilan dari suatu sistem lup tertutup linier dapat ditentukan dari letak pole lup tertutup pada bidang s . Jika terdapat pole yang terletak di sebelah kanan sumbu khayal s , maka dengan bertambahnya waktu pole tersebut akan memberikan pengaruh dominan sehingga respon transien akan monoton naik atau berosilasi dengan amplitudo semakin besar. Ini merupakan suatu sistem yang tidak stabil.

Untuk mengetahui apakah pole terletak pada sebelah kiri atau kanan sumbu khayal maka digunakan kriteria kestabilan Ruth - Hurwitz, karena dengan kriteria ini akan diketahui ada atau tidaknya akar-akar positif pada persamaan polinomial tanpa menyelesaikan persamaan tersebut.

Sebagian besar sistem lup tertutup mempunyai fungsi alih dalam bentuk :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \dots\dots\dots 3.12$$

Dari persamaan 3.11 bisa diperoleh persamaan karakteristik sistem yaitu:

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad \dots\dots 3.13$$

dimana dari persamaan karakteristik ini bisa diperoleh pole dari fungsi alih sistem.

Untuk mengetahui banyaknya pole dari polinomial dari persamaan karakteristik, maka koefisien dari persamaan 3.12 harus disusun dalam baris dan kolom sesuai dengan pola :

s^n	a_0	a_2	a_4	a_6	\dots
s^{n-1}	a_1	a_3	a_5	a_7	\dots
s^{n-2}	u_1	u_3	u_5	u_7	\dots
s^{n-3}	u_2	u_4	u_6	u_8	\dots
\vdots					
s^0	z_1				

dimana :

$$u_1 = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1}$$

$$u_3 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1}$$

$$u_2 = \frac{u_1 a_3 - u_3 a_1}{u_1}$$

$$u_4 = \frac{u_1 a_5 - u_3 a_1}{u_1}$$

dan seterusnya.

Kriteria kestabilan Routh menyatakan bahwa banyaknya akar-akar dari persamaan 3.11 yang mempunyai bagian nyata positif sama dengan banyaknya perubahan tanda dari



koefisien pada kolom pertama dari susunan tersebut.

Untuk mengetahui kestabilan sistem feedwater regulator, dari persamaan 3.10 diambil persamaan karakteristiknya, yaitu :

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad \dots\dots\dots 3.14$$

Koefisien dari persamaan 3.13 disusun menurut prosedur di atas :

s^2	1	ω_n^2
s^1	$2\zeta\omega_n$	0
s^0	$2\zeta\omega_n^3$	0

Kolom pertama dari susunan koefisien tidak menunjukkan perubahan tanda, berarti akar-akar persamaan karakteristik atau pole dari fungsi alih sistem terletak di sebelah kiri bidang s yang berarti sistem kontrol stabil.

3.3 Analisa respon transien feedwater regulator

Untuk menganalisa respon transien sistem, diperlukan suatu sinyal masukan. Sinyal masukan ini berupa masukan fungsi tangga satuan (*unit step input function*). Karena jika respon terhadap masukan tangga satuan diketahui maka secara matematis dapat dihitung respon terhadap setiap masukan.

Dari persamaan 3.11 untuk masukan tangga satuan :

$$R(s) = \frac{1}{s} \quad \dots\dots\dots 3.15$$

akan diperoleh $Q_o(s)$:

$$Q_o(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \frac{1}{s^2} + \frac{s + K}{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots 3.16$$

yang bisa diuraikan menjadi :

$$Q_o(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \left[\frac{A}{s} + \frac{Bs + C}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \right] \dots\dots\dots 3.17$$

dimana $A = \frac{K}{\omega_n^2}$; $B = -\frac{K}{\omega_n^2}$; $C = 1 - 2\zeta\omega_n$ sehingga persamaan 3.17 bisa diubah menjadi :

$$Q_o(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \left[\frac{\frac{K}{\omega_n^2}}{s} + \frac{\frac{K}{\omega_n^2}s + 1 - 2\zeta\omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \right] \dots\dots\dots 3.18$$

Dengan membalik transformasi Laplace dari persamaan 3.18 akan diperoleh respon sistem terhadap waktu, t . Dengan memfaktorkan penyebut dari persamaan 3.18 akan diperoleh :

$$Q_o(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \left[\frac{\frac{K}{\omega_n^2}}{s} + \frac{\frac{K}{\omega_n^2}s + 1 - 2\zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})(s + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})} \right] \dots\dots\dots 3.19$$

Jika frekwensi alamiah teredam dari sitem dinotasikan ω_d dan $\omega_d = \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$ maka persamaan 3.19 bisa diubah menjadi

$$Q_o(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \left[\frac{\frac{K}{\omega_n^2}}{s} + \frac{\omega_n s + 1 - 2\zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n + j\omega_d)(s + \zeta\omega_n - j\omega_d)} \right] \dots\dots\dots 3.20$$

Frekwensi alamiah, ω_d , tergantung dari parameter ζ dan ω_n . Jadi ada tiga kasus yang harus dianalisa berkaitan dengan parameter-parameter tersebut, yaitu untuk $0 < \zeta < 1$ maka akan terjadi redaman kurang (*underdamped*), untuk $\zeta = 1$ maka akan terjadi redaman kritis (*critically damped*) dan untuk $\zeta > 1$ akan terjadi redaman lebih (*overdamped*).

Kasus redaman kurang ($0 < \zeta < 1$)

Pada kasus ini, terlebih dahulu persamaan 3.18 dipecah menjadi :

$$Q_o(s) = \frac{1}{R} \left[\frac{1}{s} + \frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} - \frac{2\zeta\omega_n - 1}{k} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \right] \quad 3.21$$

Transformasi Laplace balik dari persamaan 3.22 adalah :

$$q_o(t) = \frac{1}{R} \left[1 + \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}) - \frac{2\zeta\omega_n}{k} \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t) \right] \dots 3.22$$

Jika harga K cukup besar maka persamaan 3.22 berubah menjadi :

$$q_o(t) = \frac{1}{R} \left[1 + \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}) \right] \quad 3.23$$

Kurva respon untuk kasus ini dapat dilihat pada gambar 3.3 untuk berbagai harga ζ dengan $\omega_n t$ sebagai absis dan $Rq_o(t)$ sebagai ordinat sehingga kurva hanya merupakan fungsi ζ .

Kasus redaman kritis ($\zeta = 1$)

Pada kasus ini persamaan 3.16 bisa diubah menjadi :

$$Q_o(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \frac{s + K}{s(s + \omega_n)^2} \dots\dots\dots 3.24$$

yang bisa dipecah menjadi :

$$Q_o(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \left[\frac{A}{s} + \frac{B}{(s + \omega_n)^2} + \frac{C}{(s + \omega_n)} \right] \dots\dots\dots 3.25$$

dimana $A = \frac{K}{\omega_n^2}$; $B = 1 - \frac{K}{\omega_n}$; $C = -\frac{K}{\omega_n^2}$, sehingga persamaan 3.25 menjadi :

$$Q_o(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \left[\frac{\frac{K}{\omega_n^2}}{s} + \frac{1 - \frac{K}{\omega_n}}{(s + \omega_n)^2} - \frac{\frac{K}{\omega_n^2}}{(s + \omega_n)} \right]$$

$$Q_o(s) = \frac{1}{R} \left[\frac{1}{s} + \frac{\omega_n^2/K - \omega_n}{(s + \omega_n)^2} - \frac{1}{(s + \omega_n)} \right] \dots\dots\dots 3.26$$

Transformasi Laplace balik dari persamaan 3.26 adalah :

$$q_o(t) = \frac{1}{R} \left[1 - \left(\frac{\omega_n}{K} - 1 \right) \omega_n t e^{-\omega_n t} - e^{-\omega_n t} \right] \dots\dots\dots 3.27$$

Jika harga K cukup besar, maka persamaan 3.27 berubah menjadi :

$$q_o(t) = \frac{1}{R} \left[1 - e^{-\omega_n t} (\omega_n t + 1) \right] \dots\dots\dots 3.28$$

Kurva respon untuk kasus ini dapat dilihat pada gambar 3.4 dengan $\omega_n t$ sebagai absis dan $Rq_o(t)$ sebagai ordinat sehingga kurva hanya merupakan fungsi ζ .

Kasus redaman lebih ($\zeta > 1$)

Pada kasus ini tinjau persamaan 3.11 :

$$\frac{Q_o(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{KR} \frac{(s+K)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

yang bisa ditulis menjadi :

$$\frac{Q_o(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{KR} \frac{(s+K)}{(s+s_1)(s+s_2)} \dots\dots\dots 3.29$$

dimana $s_1 = \zeta\omega_n + \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}$ dan $s_2 = \zeta\omega_n - \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}$

Untuk masukan tangga persamaan 3.29 bisa diubah menjadi :

$$Q_o(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \left[\frac{A}{s} + \frac{B}{(s+s_1)} + \frac{C}{(s+s_2)} \right] \dots\dots\dots 3.30$$

dimana harga A , B , dan C adalah :

$$A = \frac{K}{s_1 s_2} ; B = \frac{K - s_1}{s_1^2 - s_1 s_2} ; C = \frac{K - s_2}{s_2^2 - s_1 s_2}$$

Maka persamaan 3.30 menjadi :

$$Q_0(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \left[\frac{\frac{K}{s_1 s_2}}{s} + \frac{\frac{K_2 - s_1}{s_1 - s_1 s_2}}{(s + s_1)} + \frac{\frac{K_2 - s_2}{s_2 - s_1 s_2}}{(s + s_2)} \right]$$

$$Q_0(s) = \frac{\omega_n^2}{KR} \frac{K}{s_1 s_2} \left[\frac{1}{s} + \frac{s_1 s_2}{s_1 - s_2} \left(\frac{1/k - 1/s_2}{s + s_2} - \frac{1/k - 1/s_1}{s + s_1} \right) \right]$$

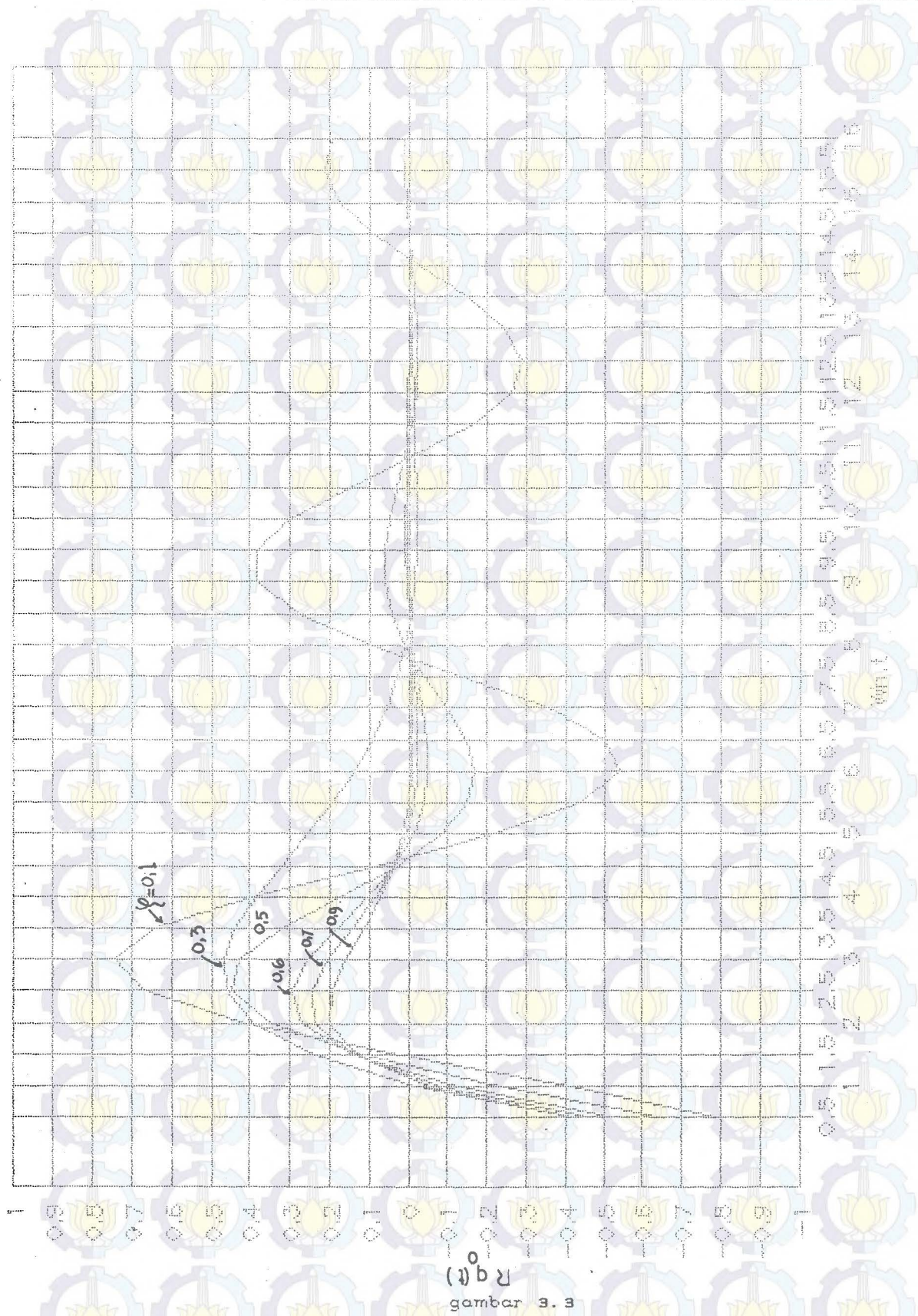
Jika harga $K \gg 1$ maka dengan mengganti s_1 dan s_2 persamaan di atas berubah menjadi :

$$Q_0(s) = \frac{1}{R} \left[\frac{1}{s} + \frac{1}{\zeta^2 - 2 + 2\zeta\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left[\frac{1}{(s + \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})} - \frac{1}{(s + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})} \right] \right] \dots\dots\dots 3.31$$

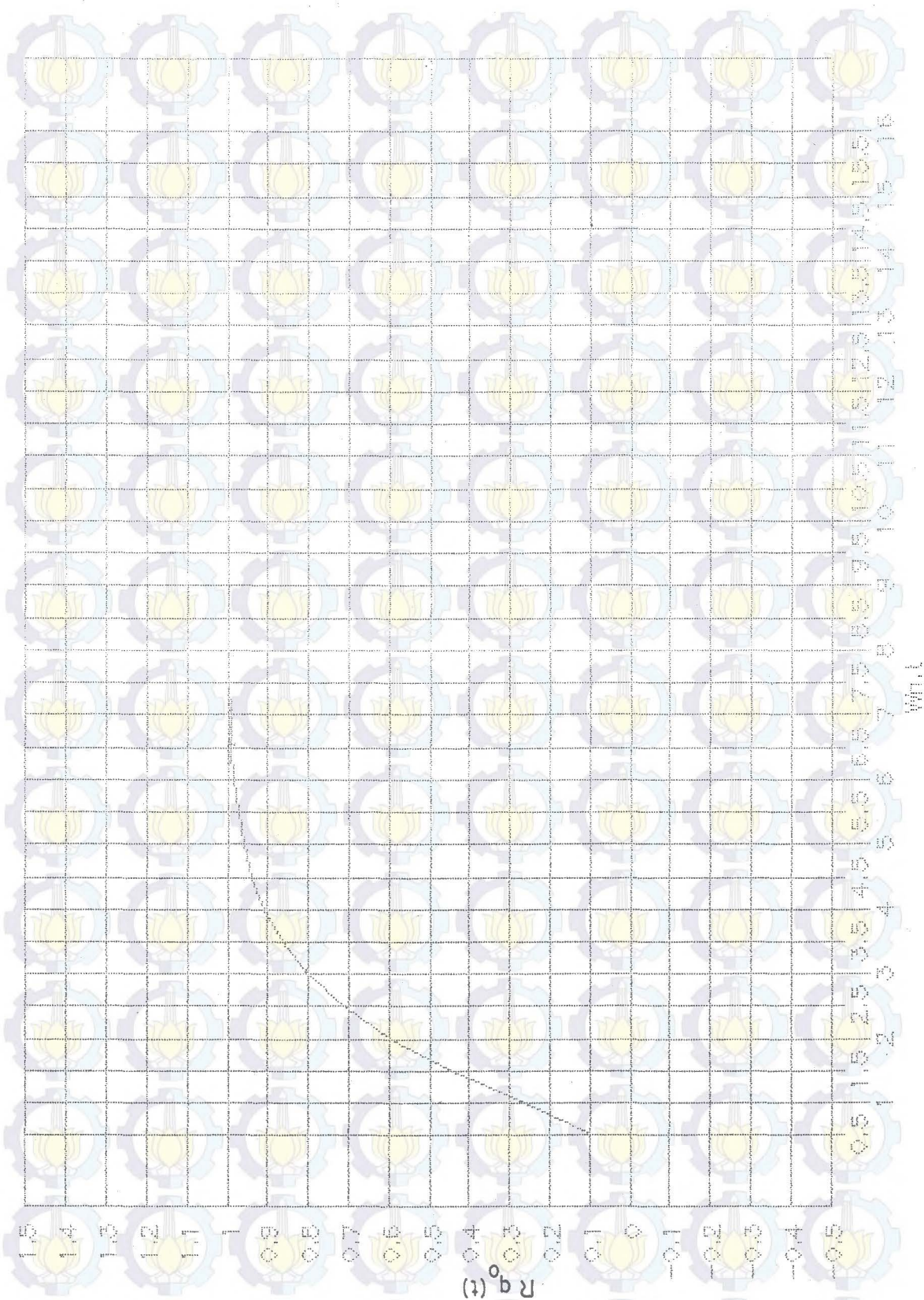
Transformasi Laplace balik dari persamaan 3.31 adalah :

$$q_0(t) = \frac{1}{R} \left[1 + \frac{1}{\zeta^2 - 2 + 2\zeta\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left(e^{-\omega_n t(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})} - e^{-\omega_n t(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})} \right) \right] \dots\dots\dots 3.32$$

Kurva respon untuk kasus ini dapat dilihat pada gambar 3.4 dengan $\omega_n t$ sebagai absis dan $Rq_0(t)$ sebagai ordinat sehingga kurva hanya merupakan fungsi ζ .

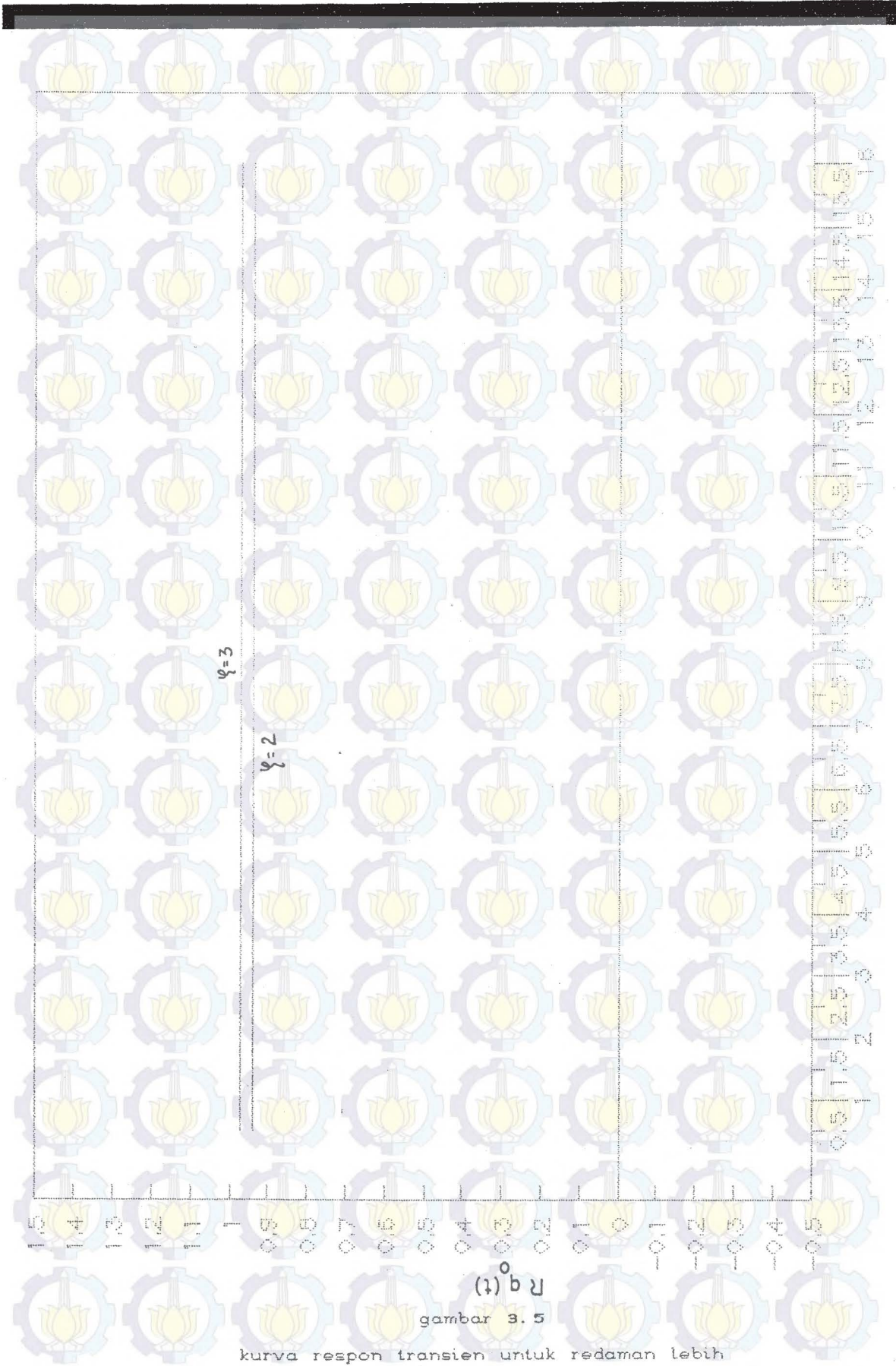


kurva respon transien untuk redaman kurang



gambar 3.4

kurva respon transien untuk redaman kritis

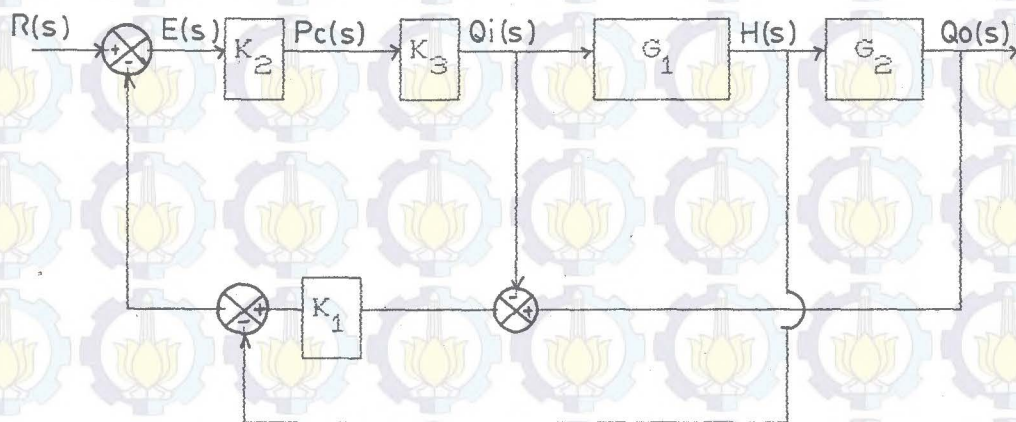


3.4 Sensitivitas feedwater regulator

Sensitivitas merupakan ukuran ketergantungan performance sistem terhadap perubahan dari suatu elemen, yang secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$S_{\frac{T}{K}} = \frac{K}{T} \frac{dT}{dK} \dots\dots\dots 3.33$$

dimana $S_{\frac{T}{K}}$ berarti sensitivitas perubahan sistem T terhadap perubahan variabel K . Untuk mencari sensitivitas atau kepekaan sistem terhadap masing-masing elemen tinjau gambar 3.1 yang bisa diubah menjadi :



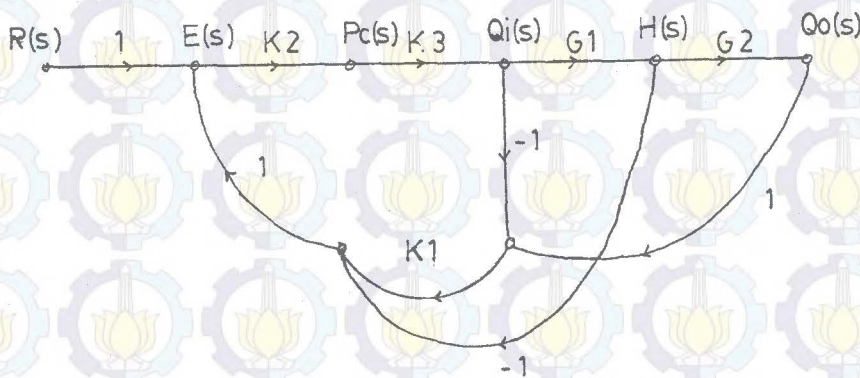
gambar 3. 6

diagram blok feedwater regulator



MILIK PERPUSTAKAAN
INSTITUT TEKNOLOGI
SEPULUH - NOPEMBER

Fungsi alih diagram blok pada gambar 3.5 dapat diturunkan dengan rumus penguatan Mason, dengan terlebih dahulu mengubah diagram blok menjadi aliran sinyal.



gambar 3.

aliran sinyal feedwater regulator

Lintasan maju dari aliran sinyal :

$$P_1 = K_2 K_3 G_1 G_2$$

sedangkan penguatan lupnya adalah :

$$L_1 = -K_2 K_3$$

$$L_2 = -K_1 K_2 K_3 G_1$$

$$L_3 = K_1 K_2 K_3 G_1 G_2$$

determinan grafik diberikan oleh :

$$\begin{aligned} \Delta &= 1 - (L_1 + L_2 + L_3) \\ &= 1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G_1 (1 - G_2) \end{aligned}$$

kofaktor Δ_1 diperoleh dari Δ dengan menghilangkan lup lup yang menyentuh P_1 , sehingga $\Delta_1 = 1$.

Fungsi alih sistem adalah :

$$T = \frac{Qo(s)}{R(s)} = \frac{K_2 K_3 G_1 G_2}{1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G_1 (1 - G_2)} \quad \dots\dots\dots 3.34$$

Sensitivitas sistem terhadap perubahan relay diferensial adalah :

$$S_{K_1}^T = \frac{K_1}{T} \frac{dT}{dK_1} \quad \dots\dots\dots 3.35$$

$$\text{dimana } \frac{dT}{dK_1} = - \frac{K_2 K_3 G_1 G_2 K_1 (1 - G_2)}{(1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G_1 (1 - G_2))^2}$$

$$= -T \frac{K_2 K_3 G_1 (G_2 - 1)}{1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G_1 (1 - G_2)}$$

sehingga persamaan 3.35 berubah menjadi :

$$\begin{aligned} S_{K_1}^T &= \frac{K_1}{T} T \frac{K_2 K_3 G_1 (G_2 - 1)}{1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G_1 (1 - G_2)} \\ &= \frac{K_1 K_2 K_3 G_1 (G_2 - 1)}{1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G_1 (1 - G_2)} \\ &= - \frac{1}{1 + \frac{1}{K_1 K_2 K_3 G_1 (1 - G_2)} + \frac{1}{K_1 (1 - G_2)}} \quad \dots\dots\dots 3.36 \end{aligned}$$

Jika harga $K_1 K_2 K_3 G(1-G_2) \gg 1$ dan $K_1(1-G_2) \gg 1$ maka persamaan 3.36 akan berubah menjadi :

$$S_{K_1}^T = -1 \dots\dots\dots 3.37$$

Yang berarti perubahan elemen K_1 akan menyebabkan perubahan sistem secara keseluruhan. Jadi elemen relai diferensial harus memiliki kestabilan dan ketelitian yang tinggi.

Sensitivitas terhadap perubahan kontroler P + I adalah :

$$S_{K_2}^T = \frac{K_2}{T} \frac{dT}{dK_2} \dots\dots\dots 3.38$$

$$\text{dimana : } \frac{dT}{dK_2} = \frac{K_3 G_1 G_2 (1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G(1-G_2))}{(1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G(1-G_2))^2}$$

$$= \frac{K_1 K_2 G_1 G_2 (K_3 + K_1 G_1 (1-G_2))}{(1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G(1-G_2))^2}$$

$$= T \left[\frac{1}{K_2} - \frac{K_3 + K_1 G_1 (1-G_2)}{1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G(1-G_2)} \right]$$

sehingga persamaan 3.38 berubah menjadi :

$$S_{K_2}^T = \frac{K_2}{T} \left[\frac{1}{K_2} - \frac{K_3 + K_1 K_2 G (1 - G_2)}{1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G (1 - G_2)} \right]$$

$$= 1 - \frac{K_1 K_2 + K_1 K_2 K_3 G (1 - G_2)}{1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G (1 - G_2)} \dots\dots\dots 3.39$$

Jika harga $K_2 K_3 \gg 1$ dan $K_1 K_2 K_3 G (1 - G_2) \gg 1$ maka persamaan 3.39 menjadi :

$$S_{K_2}^T = 0 \dots\dots\dots 3.40$$

Yang berarti perubahan elemen kontroler P+I tidak banyak berpengaruh pada sistem.

Sensitivitas sistem terhadap perubahan katup pneumatik adalah :

$$S_{K_3}^T = \frac{K_3}{T} \frac{dT}{dK_3} \dots\dots\dots 3.41$$

$$\text{dimana: } \frac{dT}{dK_3} = \frac{K_1 G G_2 (1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G (1 - G_2))}{(1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G (1 - G_2))^2}$$

$$- \frac{K_1 K_2 G G_2 (K_2 + K_1 K_2 G (1 - G_2))}{(1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G (1 - G_2))^2}$$

sehingga persamaan 3.41 berubah menjadi :

$$S_{K_3}^T = \frac{K_3}{T} \left[\frac{1}{K_3} - \frac{K_2 + K_1 K_2 G (1 - G_2)}{1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G (1 - G_2)} \right]$$

$$= 1 - \frac{K_2 + K_1 K_2 G (1 - G_2)}{1 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3 G (1 - G_2)} \dots\dots\dots 3.42$$

Jika harga $K_2 K_3 \gg 1$ dan $K_1 K_2 K_3 G (1 - G_2) \gg 1$ maka persamaan 3.42 menjadi :

$$S_{K_3}^T = 0 \dots\dots\dots 3.40$$

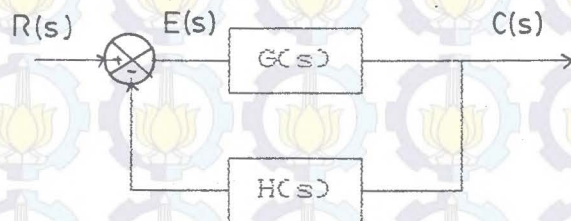
Yang berarti perubahan elemen kontroler P+I tidak banyak berpengaruh pada sistem.

3.5 Kesalahan keadaan tunak

Metode untuk menentukan performance/perilaku keadaan tunak dari sistem kontrol adalah dengan menerapkan teorema harga akhir (*final value theorem*) dari transformasi Laplace yang diberikan oleh persamaan :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s) \dots\dots\dots 3.41$$

Untuk sistem umpan balik seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7, kesalahan keadaan tunaknya adalah :



gambar 3.7

sistem kontrol dengan umpan balik

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad \dots\dots 3.41$$

Untuk masukan tangga satuan maka kesalahan keadaan tunaknya :

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \quad \dots\dots\dots 3.42$$

Koefisien kesalahan posisi statik K_p didefinisikan sebagai :

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s) \quad \dots\dots\dots 3.43$$

Jadi kesalahan penggerak keadaan tunak dalam bentuk K_p dinyatakan sebagai :

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_p} \quad \dots\dots\dots 3.44$$

Untuk sistem tipe 0,

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K(Ts+1)(Tbs+1)\dots}{(T_1s+1)(T_2s+1)\dots} = K \dots\dots\dots 3.45$$

Untuk sistem tipe 0 kesalahan penggerak keadaan tunak :

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K} \dots\dots\dots 3.46$$

Untuk sistem tipe 1 atau lebih,

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K(Ts+1)(Tbs+1)\dots}{s^N (T_1s+1)(T_2s+1)\dots} = \infty \dots\dots\dots 3.47$$

Untuk sistem tipe 1 atau lebih tinggi kesalahan penggerak keadaan tunak :

$$e_{ss} = 0 \dots\dots\dots 3.48$$

Koefisien statik merupakan ukuran kebaikan (figure of merit) dari sistem kontrol. Semakin tinggi koefisien ini, kesalahan keadaan tunaknya semakin kecil.

Untuk menentukan kesalahan keadaan tunak dari sistem yang ditunjukkan oleh gambar 3.1, maka perlu ditinjau lagi persamaan 3.2 sampai 3.5. Fungsi alih sistem ini bisa ditulis dalam :

$$\frac{Qo(s)}{R(s)} = \frac{\frac{kpkv}{RCs + 1} \left(1 + \frac{1}{Tis}\right)}{1 + \frac{kv.kp}{(RCs+1)} \left(1 + \frac{1}{Tis}\right) (k_1RCs + 1)} \dots\dots 3.49$$

Dengan mensubstitusikan :

$$G(s) = \frac{kpkv}{RCs + 1} \left(1 + \frac{1}{Tis}\right)$$

$$H(s) = (k_1RCs + 1)$$

Akan diperoleh fungsi alih sistem :

$$\frac{Qo(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \dots\dots\dots 3.50$$

Diagram blok dari fungsi alih tersebut sama dengan yang ditunjukkan pada gambar 3.7. Sedang fungsi alih antara sinyal kesalahan penggerak $E(s)$ dengan sinyal masukan $R(s)$ adalah :

$$\frac{E(s)}{R(s)} = 1 - \frac{Qo(s)}{R(s)} H(s)$$

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \dots\dots\dots 3.51$$

Sinyal kesalahan penggerak keadaan tunaknya adalah :

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)} \dots\dots\dots 3.52$$

Untuk masukan tangga, maka kesalahan penggerak keadaan tunak sistem adalah :

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \quad \dots\dots\dots 3.53$$

Koefisien kesalahan posisi statik dari sistem :

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s)$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{k_v \cdot k_p}{(RCs+1)} \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) (k_1 RCs + 1)$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{k_v k_p (T_i s + 1) (k_1 RCs + 1)}{T_i s (RCs + 1)}$$

$$K_p = \infty \quad \dots\dots\dots 3.54$$

Ini berarti : $e_{ss} = 0$

BAB IV KESIMPULAN

Dari analisa tentang sistem kontrol feedwater regulation sistem pneumatik pada boiler dengan three element control dapat diambil beberapa kesimpulan seperti di bawah ini.

1. Secara keseluruhan sistem kontrol ini adalah stabil, hal ini dibuktikan dengan adanya akar-akar persamaan karakteristik yang terletak di sebelah kiri bidang s.

2. Untuk masukan fungsi tangga satuan, seharusnya respon sistem terhadap waktu harus sama dengan satu, ternyata dari gambar 3.3 untuk kasus redaman kurang, respon sistem berosilasi sebelum mencapai harga akhirnya yaitu nol. Ini berarti terjadi penyimpangan respon untuk kasus redaman kurang.

Untuk kasus redaman kritis, terjadi kelambatan respon dari sistem sebelum mencapai harga akhirnya yaitu satu. Tetapi kondisi ini jauh lebih bagus jika dibandingkan dengan kasus redaman kurang.

Untuk kasus redaman lebih, respon dari sistem menunjukkan kurva linier yang mendekati harga akhir yang diminta (satu). Dari gambar 3.5 dapat dilihat, makin besar harga rasio redaman sistem makin mendekati harga akhir yang diminta.

3. Dari uji sensitivitas terhadap masing-masing kontroler dapat disimpulkan :

- sensitivitas sistem terhadap perubahan relai diferensial adalah sangat peka, oleh karena itu perlu dipilih relai diferensial yang memiliki kestabilan dan ketelitian yang tinggi.
- sensitivitas sistem terhadap perubahan kontroler P + I dan katup pneumatik adalah tidak banyak mempengaruhi kestabilan sistem.

4. Respon sistem pada keadaan tunak tidak mempunyai kesalahan keadaan tunak, hal ini dikarenakan koefisien kesalahan statik dari sistem mempunyai harga tak berhingga (sistem bertipe 1) sehingga kesalahan keadaan tunaknya sama dengan nol.

KOORDINAT KURVA RESPON TRANSIEN
KOORDINAT KURVA RESPON TRANSIEN

Z = 0.1			Z = 0.3			Z = 0.5		
Wnt	Rqo(t)		Wnt	Rqo(t)		Wnt	Rqo(t)	
0,5	-0,79048	:	0,5	-0,64026	:	0,5	-0,51814	:
1	-0,41670	:	1	-0,23837	:	1	-0,12608	:
1,5	0,018597	:	1,5	0,109786	:	1,5	0,136015	:
2	0,408149	:	2	0,344494	:	2	0,268789	:
2,5	0,665536	:	2,5	0,445497	:	2,5	0,297536	:
3	0,743363	:	3	0,426078	:	3	0,257645	:
3,5	0,640582	:	3,5	0,321553	:	3,5	0,183808	:
4	0,398326	:	4	0,176092	:	4	0,103606	:
4,5	0,086312	:	4,5	0,031075	:	4,5	0,034996	:
5	-0,21612	:	5	-0,08293	:	5	-0,01336	:
5,5	-0,43942	:	5,5	-0,14985	:	5,5	-0,04012	:
6	-0,53909	:	6	-0,16772	:	6	-0,04862	:
6,5	-0,50366	:	6,5	-0,14548	:	6,5	-0,04440	:
7	-0,35426	:	7	-0,09822	:	7	-0,03329	:
7,5	-0,13653	:	7,5	-0,04244	:	7,5	-0,02014	:
8	0,092296	:	8	0,007867	:	8	-0,00828	:
8,5	0,277843	:	8,5	0,043474	:	8,5	0,000507	:
9	0,380999	:	9	0,060656	:	9	0,005741	:
9,5	0,385566	:	9,5	0,060552	:	9,5	0,007809	:
10	0,299862	:	10	0,047666	:	10	0,007559	:
10,5	0,152446	:	10,5	0,028035	:	10,5	0,005951	:
11	-0,01646	:	11	0,007561	:	11	0,003829	:
11,5	-0,16546	:	11,5	-0,00920	:	11,5	0,001804	:
12	-0,26173	:	12	-0,01968	:	12	0,000228	:
12,5	-0,28786	:	12,5	-0,02327	:	12,5	-0,00077	:
13	-0,24442	:	13	-0,02101	:	13	-0,00122	:
13,5	-0,14817	:	13,5	-0,01489	:	13,5	-0,00127	:
14	-0,02656	:	14	-0,00721	:	14	-0,00105	:
14,5	0,089670	:	14,5	0,000008	:	14,5	-0,00071	:
15	0,173951	:	15	0,005355	:	15	-0,00037	:
15,5	0,209682	:	15,5	0,008183	:	15,5	-0,00009	:
16	0,193157	:	16	0,008547	:	16	0,000093	:

KOORDINAT KURVA RESPON TRANSIEN
KOORDINAT KURVA RESPON TRANSIEN

Z = 0.6			Z = 0.7			Z = 0.9		
Wnt	Rqo(t)		Wnt	Rqo(t)		Wnt	Rqo(t)	
0,5	-0,46575	:	0,5	-0,41569	:	0,5	-0,42585	:
1	-0,08689	:	1	-0,05549	:	1	-0,02224	:
1,5	0,137037	:	1,5	0,130798	:	1,5	0,240449	:
2	0,234710	:	2	0,198699	:	2	0,391944	:
2,5	0,245101	:	2,5	0,196510	:	2,5	0,459953	:
3	0,205674	:	3	0,160387	:	3	0,468780	:
3,5	0,146165	:	3,5	0,114090	:	3,5	0,438661	:
4	0,086591	:	4	0,071067	:	4	0,385660	:
4,5	0,037950	:	4,5	0,037322	:	4,5	0,321913	:
5	0,004266	:	5	0,014139	:	5	0,256089	:
5,5	-0,01500	:	5,5	0,000264	:	5,5	0,193953	:
6	-0,02282	:	6	-0,00657	:	6	0,138950	:
6,5	-0,02290	:	6,5	-0,00875	:	6,5	0,092763	:
7	-0,01873	:	7	-0,00825	:	7	0,055807	:
7,5	-0,01299	:	7,5	-0,00654	:	7,5	0,027644	:
8	-0,00745	:	8	-0,00453	:	8	0,007320	:
8,5	-0,00304	:	8,5	-0,00274	:	8,5	-0,00638	:
9	-0,00005	:	9	-0,00137	:	9	-0,01475	:
9,5	0,001590	:	9,5	-0,00046	:	9,5	-0,01904	:
10	0,002201	:	10	0,000068	:	10	-0,02035	:
10,5	0,002132	:	10,5	0,000316	:	10,5	-0,01965	:
11	0,001701	:	11	0,000381	:	11	-0,01769	:
11,5	0,001151	:	11,5	0,000344	:	11,5	-0,01507	:
12	0,000637	:	12	0,000265	:	12	-0,01223	:
12,5	0,000298	:	12,5	0,000179	:	12,5	-0,00945	:
13	-0,00002	:	13	0,000105	:	13	-0,00694	:
13,5	-0,00016	:	13,5	0,000050	:	13,5	-0,00478	:
14	-0,00021	:	14	0,000014	:	14	-0,00302	:
14,5	-0,00019	:	14,5	-0,00000	:	14,5	-0,00165	:
15	-0,00015	:	15	-0,00001	:	15	-0,00063	:
15,5	-0,00010	:	15,5	-0,00001	:	15,5	0,000063	:
16	-0,00005	:	16	-0,00001	:	16	0,000513	:

KOORDINAT KURVA RESPON TRANSIEN

Z = 1			Z = 2			Z = 3		
Wnt	:	Rqo(t)	Wnt	:	Rqo(t)	Wnt	:	Rqo(t)
0,5	:	0,090156	0,5	:	0,941626	0,5	:	0,974425
1	:	0,264164	1	:	0,941626	1	:	0,974425
1,5	:	0,442087	1,5	:	0,941626	1,5	:	0,974425
2	:	0,593909	2	:	0,941626	2	:	0,974425
2,5	:	0,712628	2,5	:	0,941626	2,5	:	0,974425
3	:	0,800789	3	:	0,941626	3	:	0,974425
3,5	:	0,864062	3,5	:	0,941626	3,5	:	0,974425
4	:	0,908383	4	:	0,941626	4	:	0,974425
4,5	:	0,938872	4,5	:	0,941626	4,5	:	0,974425
5	:	0,959551	5	:	0,941626	5	:	0,974425
5,5	:	0,973420	5,5	:	0,941626	5,5	:	0,974425
6	:	0,982637	6	:	0,941626	6	:	0,974425
6,5	:	0,988716	6,5	:	0,941626	6,5	:	0,974425
7	:	0,992699	7	:	0,941626	7	:	0,974425
7,5	:	0,995295	7,5	:	0,941626	7,5	:	0,974425
8	:	0,996978	8	:	0,941626	8	:	0,974425
8,5	:	0,998065	8,5	:	0,941626	8,5	:	0,974425
9	:	0,998764	9	:	0,941626	9	:	0,974425
9,5	:	0,999213	9,5	:	0,941626	9,5	:	0,974425
10	:	0,999500	10	:	0,941626	10	:	0,974425
10,5	:	0,999682	10,5	:	0,941626	10,5	:	0,974425
11	:	0,999799	11	:	0,941626	11	:	0,974425
11,5	:	0,999873	11,5	:	0,941626	11,5	:	0,974425
12	:	0,999920	12	:	0,941626	12	:	0,974425
12,5	:	0,999949	12,5	:	0,941626	12,5	:	0,974425
13	:	0,999968	13	:	0,941626	13	:	0,974425
13,5	:	0,999980	13,5	:	0,941626	13,5	:	0,974425
14	:	0,999987	14	:	0,941626	14	:	0,974425
14,5	:	0,999992	14,5	:	0,941626	14,5	:	0,974425
15	:	0,999995	15	:	0,941626	15	:	0,974425
15,5	:	0,999996	15,5	:	0,941626	15,5	:	0,974425
16	:	0,999998	16	:	0,941626	16	:	0,974425

DAFTAR PUSTAKA

1. Ogata, Katsuhiko, " *Teknik Kontrol Otomatik* ", penerbit Erlangga Cetakan ketiga 1990.
2. Taylor ,D.A. , " *Marine Control Practice* ", Butterworths & Co. Ltd. 1987
3. Taylor ,D.A. , " *Introduction To Marine Engineering* ", Butterworths & Co. Ltd. 1983
4. James H Hamilton, FI MarE, MINECIES and Roy M Leach, C Eng MI MechE, FIMarE , " *Marine Steam Boiler* " , Butterworths & Co. Ltd. 1987
5. Sienners , Stanley M , " *Modern Control System Theory and Application* "
6. Suryo Kusumo, Guwasonoadi Dipl. LE, " *Teknik Pengukuran dan Pengaturan* " , Tarsito Bandung 1991



MILIK PERPUSTAKAAN
INSTITUT TEKNOLOGI
SEPULUH - NOPEMBER